

Estado del arte del proyecto: “Optimización de un intercambiador de calor para la recuperación energética en generadores termoelectricos aplicados a motores diésel estacionarios”

Autores: Jorge Silva Ortega - Rafael Ramirez Restrepo- Alexis Sagastume Gutierrez.

Resumen:

Los intercambiadores de calor aplicados en dispositivos termoelectricos en comparación a otros sistemas de recuperación de calor residual, tales como turbo-máquinas y sistemas cuyo funcionamiento se basa en ciclos termodinámicos, poseen la ventaja de no tener piezas móviles, cuentan con un tamaño compacto y un rendimiento energético alto [6][7]. Estas ventajas han conllevado que grupos de investigación en todo el mundo busquen aumentar la eficiencia de conversión de energía, enfocando sus esfuerzos en materiales y diseños utilizados para los intercambiadores de calor en los dispositivos termoelectricos aplicados a motores de combustión interna [7], pero el estudio de la aplicación en motores Diésel es bastante bajo, lo cual supone un alto potencial investigativo y de aportes en esta rama del saber. Aun cuando las investigaciones han demostrado la viabilidad del uso de intercambiadores de calor para la recuperación energética del calor de los gases de escape, y se han desarrollado diferentes tipos de implementaciones como el uso de aletas rectangulares y otros tipos de intercambiadores como los de tipo EGR (Recirculación de gases de escape, por sus siglas en Ingles), no se ha logrado una conversión significativa directa de energía residual (en este caso calor residual de los gases de escape) a energía eléctrica, dada la baja eficiencia térmica de los intercambiadores de calor existentes que no exceden el 2,8 % en aplicaciones con termoelectricos [14]. Debido a esto, surge la necesidad de desarrollar un intercambiador de calor optimizado sea de nueva o mejorada geometría, que permita aumentar la eficiencia en la recuperación directa de calor a energía eléctrica, superando el 2,8 % existente mediante el dispositivo termoelectrico, para esto es necesario lograr un diseño optimizado del intercambiador que alcance una temperatura superficial lo más alta posible en la superficie del dispositivo termoelectrico en contacto con el mismo, respecto a los equipos existentes intercambiadores de calor cuando el motor Diésel opera en las mismas condiciones de potencia mecánica de salida. El aumento en la eficiencia energética del motor Diésel al entregar su potencia mecánica nominal y adicionalmente obtener energía eléctrica mediante el diseño del intercambiador optimizado, permite aumentar la utilidad de una misma cantidad de combustible, con lo cual se logra un menor costo operativo y menor cantidad de emisiones contaminantes, debido al menor uso de combustible para suministrar la misma potencia (suma de la potencia del motor y el dispositivo termoelectrico). Teniendo en cuenta los millones de motores Diésel existentes, la mejora alcanzada beneficia al medio ambiente en relación a la reducción de emisiones contaminantes derivadas de la quema de combustible fósiles.

Marco teórico:

El modelado del intercambio de calor en un software CFD permitirá definir un perfil de temperatura en las caras de contacto con el dispositivo generador termoeléctrico, el cual está conformado por dos capas de módulos termoeléctricos (TE), las cuales se encuentran entre el intercambiador de calor y un sistema de refrigeración. Cada módulo TE se encuentra formado por termopares (un semiconductor tipo p y uno tipo n), los cuales se encuentran conectados térmicamente en serie mediante placas de cobre. Los módulos TE están separados de las paredes del intercambiador de calor y el sistema de refrigeración mediante placas cerámicas. A medida que los gases de escape circulan por el intercambiador de calor, este disminuye su temperatura cuando los módulos TE absorben calor procedente de estos gases. De igual forma, el fluido (agua) que circula por el sistema de refrigeración, aumenta su temperatura al absorber el calor que es cedido por los módulos TE. El modelo matemático del módulo TE considera que las propiedades de este se mantienen constantes, se tiene en consideración el efecto Thomson (conversión directa de la diferencia de temperatura a voltaje eléctrico) e ignora la transferencia de calor por radiación. A continuación, se listan las variables a utilizar en el desarrollo de los modelos matemáticos, junto a su descripción y unidades.

Símbolo Significado Unidades

c Capacidad de calor específica [kJ/kg K] m Caudal másico [kg/s] T Temperatura [°C] I Corriente [A] α Coeficiente Seebeck [V/°C] q Calor [J]

l_2 Ancho del semiconductor [mm] l_3 Profundidad del semiconductor [mm] n_y Número de semiconductores en el eje y [-] n_x Número de semiconductores en el eje x [-] R Resistencia eléctrica [Ω] D_f Diámetro hidráulico [mm] k_f Conductividad térmica [W/cm°C] N Número de Nusselt [-] h_f Coeficiente de convección [W/m²] d_f Densidad [kg/m³] u_f Velocidad del gas de escape [m/s] ΔP Caída de presión [m] f Factor de fricción [-] w Ancho del intercambiador de calor [m] h Intercambiador de calor alto [m] L Longitud del intercambiador de calor [m] D_f Diámetro hidráulico [mm] k_f Conductividad térmica [W/cm°C] N Número de Nusselt [-] h_f Coeficiente de convección [W/m²] d_f Densidad [kg/m³] u_f Velocidad del gas de escape [m/s]

Las ecuaciones que describen las transferencias de calor de cada termopar son:

$$q_{(f,i)} = 0.5 c_f m_f (T_{(f,i)} - T_{(f,i+1)}) = n_y (2 l_2 \left[\frac{1}{l_3} \right] k_f [0.5 (T_{(f,i)} + T_{(f,i+1)}) - T_{(h5,i)}]) \quad (1)$$

$$q_{(w,i)} = 0.5 \left[\frac{c}{w} \right] \left[\frac{m}{w} \right] w (T_{(w,i+1)} - T_{(w,i)}) = n_y (2 l_2 \left[\frac{1}{l_3} \right] k_f [T_{(c5,i)} - 0.5 (T_{(w,i)} + T_{(w,i+1)})]) \quad (2)$$

(a) Como se desea cuantificar el potencial de recuperación energética del intercambiador de calor interactuado con la celda Peltier, la corriente presente en un termopar está definida por:

$$I = (\alpha_{pn} (T_{(h5,i)} - T_{(c5,i)})) / (R_L + R_{pn}) \quad (2)$$

Donde R_L es la resistencia eléctrica externa. Al considerar que la resistencia externa es igual a la resistencia eléctrica interna del termopar, se tiene que la resistencia total externa es:

$$R_L = n_x \left[\frac{n}{y} \right] \left[\frac{R}{pn} \right] \quad (3)$$

La corriente total de una de las capas de los módulos termoeléctricos está dada por:

$$I = \left[\sum_{i=1}^{n_x} \left(\frac{n_y \left[\frac{\alpha}{pn} \right] (T_{(h5,i)} - T_{(c5,i)})}{2 n_x \left[\frac{n}{y} \right] \left[\frac{R}{pn} \right]} \right) \right] \quad (4)$$

La potencia total del dispositivo TEG está dada por:

$$P_{TE} = 2 \sum_{i=1}^{n_x} (q_{(f,i)} - q_{(w,i)}) \quad (5)$$

Desde el punto de vista del intercambiador de calor, dado que la sección transversal por donde circulan los gases de escape no es circular, se requiere calcular el diámetro hidráulico equivalente:

$$D_f = (0.5 \cdot w \cdot h) / (w + h) \quad (6)$$

Donde w y h son el ancho y la altura del canal interno del intercambiador de calor respectivamente. El coeficiente de transferencia de calor por convección de los gases de escape se calcula como:

$$h_f = (Nu_f \left[\frac{k}{D_f} \right]) \quad (7)$$

Donde k_f es la conductividad térmica de los gases de escape. La caída de presión que genera el

intercambiador de calor está dada por: $\Delta P = 4 \cdot f \cdot (L / (D_f)) \cdot ((d_f / 4) \cdot (u_f^2))$ (8) Donde L , d_f y u_f son la longitud del intercambiador de calor, densidad y velocidad de los gases de escape respectivamente. La pérdida de potencia debido a la caída de presión se define como: $P_{\text{perdida}} = \Delta P \cdot (m_f / d_f)$ (9) A la potencia obtenida de los módulos TEG, se debe restar la potencia perdida por la caída de presión para obtener la potencia neta. $P_{\text{neta}} = P_{\text{TEG}} - P_{\text{perdida}}$ (10) La eficiencia de conversión está definida como: $\eta = P_{\text{neta}} / Q_h$ (11) Algunas consideraciones adicionales para los modelos son:

- Presión uniforme en la entrada de intercambiador de calor. Esta suposición tiene validez debido a que la velocidad del fluido es menor a la velocidad del sonido, lo cual permite uniformidad en la medida de la presión en la entrada.
- Los gases de escape se comportan como gases ideales. La validez de este supuesto se debe a que se obtienen márgenes de error muy pequeños respecto a los valores reales. Esto puede ser corroborado por los excelentes resultados obtenidos por distintos autores teniendo en cuenta entre sus fundamentos de modelado esta consideración [45], [48].
- Los calores específicos de las sustancias dependen exclusivamente de la composición química del gas y de su temperatura. Esto es consecuencia del supuesto anterior, ya que para una mezcla de gases de ideales el cálculo de su respectivo calor específico depende netamente de la composición del mismo y de su temperatura.
- Propiedades termodinámicas como la energía interna y la entalpía son calculadas en base de la temperatura promedio en cada punto de análisis. Si bien es cierto que existe una distribución de temperatura a lo largo de la sección transversal y esto podría generar errores al momento de los cálculos, los fenómenos de difusión y transferencia de calor presentes tienden a estabilizar la temperatura de forma uniforme a lo largo del recorrido del intercambiador de calor, lo cual disminuye el error en los cálculos [45].
- Se considera la transferencia de calor a través de las paredes laterales. Esta consideración es necesaria para obtener resultados más precisos y acordes a la realidad del fenómeno. De no tomarse en cuenta, esto conllevaría a una temperatura superficial errónea en el intercambiador de calor y por ende una tasa de recuperación energética irreal. Las caídas de presión en las tuberías y a través del intercambiador de calor (IC) son consideradas. Esta consideración es tomada en cuenta para analizar la influencia de la caída de presión en el IC sobre el desempeño del motor debido a la contrapresión de los gases de escape.

Estado del arte:

A continuación, se lista los antecedentes más relevantes sobre la temática de estudios revisados hasta el momento. Tabla 1. Antecedentes del proyecto de investigación doctoral

Titulo	Autor	Año	Universidad y País	Relación con el tema propuesto	Comentarios
Heat transfer investigations in a modern diesel engine	C. Finol Parra	[50] / 2015	University of Bath, Reino Unido	Modelado de intercambiadores de calor para gases de escape en motores Diésel modernos.	Define geometrías base para estudio de IC en recuperación de energía en gases de escape.
Experimental Investigations of Combustion Chamber Heat Transfer in a Light-Duty Diesel Engine	J. Dahlstrom	[51] / 2016	Lund University, Suecia	Estudio experimental del potencial energético de los gases de escape para la recuperación energética.	Define niveles de temperatura de los gases de escape en motores

estacionarios bajo diferentes condiciones de operación. Aportaciones al estudio y modelado Termodinámico en Motores de Combustión Interna. / J.E. Duarte [11]./ 2016 / Universidad del Norte, Colombia./ Definición de modos de prueba para validación experimental. /Expone una metodología en donde el ensayo del ciclo de homologación europeo NEDC de motores Diésel, de manera que se puede llevar a cabo en un banco de ensayos de motor estacionario. Artículos Experimental study of energy utilization effectiveness of thermoelectric generator on diesel engine. /T. Y. Kim, A. A. Negash, and G. Cho [12]./ 2017/ Energy Potencial de uso de termoelectricos para la recuperación energética. La eficiencia de conversión de energía y la potencia de salida pueden ser mejoradas al reducir la pérdida de calor. / Un descenso de la temperatura del refrigerante de 293 a 283 K aportó un aumento del 1,5% y 3,7% en la potencia máxima. Optimization design method of thermoelectric generator based on exhaust gas parameters for recovery of engine waste heat. / W. He, S. Wang, X. Zhang, Y. Li, and C. Lu [13]./ 2015/ Energy Potencial de uso de termoelectricos para la recuperación energética./ Los parámetros de los gases de escape pueden fluctuar durante el funcionamiento del motor y esto influye sobre el rendimiento del termoelectrico, por lo cual es necesario elegir un tamaño óptimo para el termoelectrico y la dirección del flujo logrando un alto nivel de recuperación de energía para una gama amplia de condiciones de funcionamiento del motor. Waste heat recovery of a diesel engine using a thermoelectric generator equipped with customized thermoelectric modules. / T. Y. Kim, A. A. Negash, and G. Cho [14]. / 2016 / Energy Convers. Manag / Potencial de uso de termoelectricos para la recuperación energética./ El rendimiento de recuperación del calor residual se llevó a cabo para tres velocidades de rotación del motor 1000, 1500 y 2000 rpm y variado la carga del motor en un intervalo de 0,2 – 1 MPa, manteniendo constantes el caudal de refrigerante y la temperatura a 8 LPM y 293 K respectivamente. Recent development and application of thermoelectric generator and cooler. / W. He, G. Zhang, X. Zhang, J. Ji, G. Li, and X. Zhao [15]./ 2015/ Appl. Energy. / Potencial de uso de termoelectricos para la recuperación energética. / Se estudia la cantidad y distribución de aletas en el tubo de escape. La investigación realizada con una configuración de aleta de sección transversal hexagonal de tubería muestra que el aumentar el número de aletas no existe un aumento de potencia en el generador eléctrico y además de esto, al dejar un espaciado entre las configuraciones de aletas se tiene un mayor aprovechamiento de la energía de los gases de escape. Waste heat recovery from a diesel engine using shell and tube heat exchanger. / S. Bari and S. N. Hossain [2]./ 2013/ Appl. Therm. Eng./ Definición de consideraciones para simulación en ANSYS®./ Se implementó un modelado de intercambiadores en el software ANSYS, comparando los resultados con datos experimentales, de manera que se encontró una geometría óptima para la aplicación y condiciones de operación. Effect of heat exchanger material and fouling on thermoelectric exhaust heat recovery. / N. D. Love, J. P. Szybist, and C. S. Sluder [16]. / 2012 / Appl. Energy. / Permite definir condiciones para el análisis paramétrico del dispositivo termoelectrico. / Se ensayaron con caudales de flujo de escape en el rango de 40 y 150 LPM, temperatura de los gases de escape entre 240°C y 280°C, y la temperatura del lado del refrigerante entre 40°C y 80°C. Este estudio concluye que la potencia eléctrica del dispositivo termoelectrico se incrementa al presentarse un aumento en la temperatura de los gases de escape. Exhaust Energy Recovery Using Thermoelectric Power Generation From A Thermally Insulated Diesel Engine. / B. Karthikeyan, D. Kesavaram, S. Ashok Kumar, and K. Srithar [18]. / 2013 / International Journal of Green Energy / Se obtiene un aumento del 12.5% en la eficiencia del módulo con aislamiento térmico de la cámara de combustión en comparación con el motor de referencia. / Mediante la aplicación de un espesor de 400 μm

de revestimiento de aislamiento de alúmina-titania en la cara de corona del pistón y culata, 8-20% de la energía disponible en los gases de escape es recuperada utilizando el módulo TEPG, con la salida de potencia más alta de 574 W. De la tabla 1. se puede concluir que se tiene un potencial de investigación en la temática, debido a que los estudios están enfocados a aplicaciones vehiculares, mas no a aplicaciones estacionarias, en donde por la potencia de salida de estos motores, el potencial de recuperación energético es mucho mayor. La revisión del estado del arte permite visualizar lo pertinente de la investigación que se está proponiendo, dado que se observa el incremento sustancial en el último año de los artículos científicos relacionados con la temática, lo cual indica el potencial de publicabilidad de los productos de la presente tesis doctoral. La novedad de la investigación que se va a desarrollar radica en el hecho de que los estudios no se han aplicado a motores estacionarios, por otro lado esta la optimización de intercambiadores de calor aplicados en dispositivos termoeléctricos, por lo que el potencial de recuperación es más alto, puesto que algunos de estos motores pueden manejar potencias de salida por encima de los 10 MW. Además, representa un aporte científico al estudio termodinámico y en mecánica de fluidos computacional, así mismo establece las bases preliminares de una metodología para el diseño de intercambiadores de calor propuesto de manera óptima.

Bibliografía:

- [1] S. S. Hoseini, G. Najafi, B. Ghobadian, R. Mamat, N. A. C. Sidik, and W. H. Azmi, “The effect of combustion management on diesel engine emissions fueled with biodiesel-diesel blends,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 73, no. October 2015, pp. 307–331, 2017.
- [2] S. Bari and S. N. Hossain, “Waste heat recovery from a diesel engine using shell and tube heat exchanger,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 61, no. 2, pp. 355–363, 2013.
- [3] J.-H. Meng, X.-D. Wang, and W.-H. Chen, “Performance investigation and design optimization of a thermoelectric generator applied in automobile exhaust waste heat recovery,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 120, pp. 71–80, 2016.
- [4] T. Y. Kim, A. A. Negash, and G. Cho, “Experimental study of energy utilization effectiveness of thermoelectric generator on diesel engine,” *Energy*, vol. 128, pp. 531–539, 2017.
- [5] E. Feru, B. de Jager, F. Willems, and M. Steinbuch, “Two-phase plate-fin heat exchanger modeling for waste heat recovery systems in diesel engines,” *Appl. Energy*, vol. 133, pp. 183–196, 2014.
- [6] T. Y. Kim, S. Lee, and J. Lee, “Fabrication of thermoelectric modules and heat transfer analysis on internal plate fin structures of a thermoelectric generator,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 124, pp. 470–479, 2016.

- [7] T. Y. Kim, A. A. Negash, and G. Cho, "Waste heat recovery of a diesel engine using a thermoelectric generator equipped with customized thermoelectric modules," *Energy Convers. Manag.*, vol. 124, pp. 280–286, 2016.
- [8] D. Champier, "Thermoelectric generators: A review of applications," *Energy Convers. Manag.*, vol. 140, pp. 167–181, 2017.
- [9] A. Negash, "Direct contact thermoelectric generator (DCTEG): A concept for removing the contact resistance between thermoelectric modules and heat source," *Energy Convers. Manag.*, vol. 142, pp. 20–27, 2017.
- [10] B. D. In, H. I. Kim, J. W. Son, and K. H. Lee, "The study of a thermoelectric generator with various thermal conditions of exhaust gas from a diesel engine," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 86, pp. 667–680, 2015.
- [11] J.E. Duarte, "Aportaciones al estudio y modelado Termodinámico en Motores de Combustión Interna". Tesis Doctoral. Universidad de Norte, Dpto. de Ingeniería de Mecánica, Barranquilla, Colombia, 2016.
- [12] T. Y. Kim, A. A. Negash, and G. Cho, "Experimental study of energy utilization effectiveness of thermoelectric generator on diesel engine," *Energy*, vol. 128, pp. 531–539, 2017.
- [13] W. He, S. Wang, X. Zhang, Y. Li, and C. Lu, "Optimization design method of thermoelectric generator based on exhaust gas parameters for recovery of engine waste heat," *Energy*, vol. 91, pp. 1–9, 2015.
- [14] T. Y. Kim, A. A. Negash, and G. Cho, "Waste heat recovery of a diesel engine using a thermoelectric generator equipped with customized thermoelectric modules," *Energy Convers. Manag.*, vol. 124, pp. 280–286, 2016.
- [15] W. He, G. Zhang, X. Zhang, J. Ji, G. Li, and X. Zhao, "Recent development and application of thermoelectric generator and cooler," *Appl. Energy*, vol. 143, pp. 1–25, 2015.
- [16] N. D. Love, J. P. Szybist, and C. S. Sluder, "Effect of heat exchanger material and fouling on thermoelectric exhaust heat recovery," *Appl. Energy*, vol. 89, no. 1, pp. 322–328, 2012.
- [17] F. Kyriakidis, K. Sørensen, S. Singh and T. Condra, "Modeling and optimization of integrated exhaust gas recirculation and multi-stage waste heat recovery in marine engines," *Energy Conversion and Management*, vol. 151, pp. 286-295, 2017.
- [18] B. Karthikeyan, D. Kesavaram, S. Ashok Kumar and K. Srithar, "Exhaust energy recovery using thermoelectric power generation from a thermally insulated diesel engine," *International journal of green energy*, vol. 10, no. 10, pp. 1056-1071, 2013.

- [19] J. G. Haidar and J. I. Ghojel, "Waste heat recovery from the exhaust of low-power diesel engine using thermoelectric generators," *Thermoelectr. 2001. Proc. ICT 2001. XX Int. Conf.*, pp. 413–418, 2001.
- [20] J. S. Jadhao and D. G. Thombare, "Review on Exhaust Gas Heat Recovery for I.C. Engine," *Certif. Int. J. Eng. Innov. Technol.*, vol. 9001, no. 12, pp. 2277–3754, 2008.
- [21] S. N. Hossain and S. Bari, Waste heat recovery using shell and tube heat exchanger from the exhaust of an automotive engine, *Proceedings of the 13th Asian Congress of Fluid Mechanics*, pp. 17-21, 2010.
- [22] K. T. Wojciechowski, M. Schmidt, R. Zybala, J. Merkisz, P. Fuc, and P. Lijewski, "Comparison of waste heat recovery from the exhaust of a spark ignition and a diesel engine," *J. Electron. Mater.*, vol. 39, no. 9, pp. 2034–2038, 2010.
- [23] N. Espinosa, M. Lazard, L. Aixala, and H. Scherrer, "Modeling a thermoelectric generator applied to diesel automotive heat recovery," *J. Electron. Mater.*, vol. 39, no. 9, pp. 1446–1455, 2010.
- [24] S. Hossain and S. Bari, Effect of Different Working Fluids on Shell and Tube Heat Exchanger to Recover Heat from Exhaust of an Automotive Diesel Engine, *World Renewable Energy Congress*, pp.8-13, 2011.
- [25] V. Pandiyarajan, M. Chinna Pandian, E. Malan, R. Velraj, and R. V. Seeniraj, "Experimental investigation on heat recovery from diesel engine exhaust using finned shell and tube heat exchanger and thermal storage system," *Appl. Energy*, vol. 88, no. 1, pp. 77–87, 2011.
- [26] C. Baker, P. Vuppuluri, L. Shi, and M. Hall, "Model of heat exchangers for waste heat recovery from diesel engine exhaust for thermoelectric power generation," *J. Electron. Mater.*, vol. 41, no. 6, pp. 1290–1297, 2012.
- [27] V. Sandu, A. C. Stanca, A. Pasaroïu, and D. Dobre, "Experimental investigation of thermoelectric heat recovery from a diesel engine," in *2012 International Conference on Applied and Theoretical Electricity, ICATE 2012 - Proceedings*, 2012.
- [28] M. M. Aslam Bhutta, N. Hayat, M. H. Bashir, A. R. Khan, K. N. Ahmad, and S. Khan, "CFD applications in various heat exchangers design: A review," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 32, no. 1, pp. 1–12, 2012.
- [29] S. Bari and S. N. Hossain, "Waste heat recovery from a diesel engine using shell and tube heat exchanger," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 61, no. 2, pp. 355–363, 2013.
- [30] C. Paz, E. Suárez, A. Eirís, and J. Porteiro, "Development of a predictive CFD fouling model for diesel engine exhaust gas systems," *Heat Transf. Eng.*, vol. 34, no. 8–9, pp. 674–682, 2013.

[31] B. Karthikeyan, D. Kesavaram, S. Ashok Kumar, and K. Srithar, "Exhaust energy recovery using thermoelectric power generation from a thermally insulated diesel engine," *Int. J. Green Energy*, vol. 10, no. 10, pp. 1056–1071, 2013.

[32] V. Mokkapati and C. Sen Lin, "Numerical study of an exhaust heat recovery system using corrugated tube heat exchanger with twisted tape inserts," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 57, pp. 53–64, 2014.

[33] M. Hatami, D. D. Ganji, and M. Gorji-Bandpy, "CFD simulation and optimization of ICEs exhaust heat recovery using different coolants and fin dimensions in heat exchanger," *Natural Comput. Appl.*, vol. 25, no. 7–8, pp. 2079–2090, 2014.

[34] M. Hatami, D. D. Ganji, and M. Gorji-Bandpy, "Numerical study of finned type heat exchangers for ICEs exhaust waste heat recovery," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 4, pp. 53–64, 2014.

[35] M. Hatami, M. Jafaryar, D. D. Ganji, and M. Gorji-Bandpy, "Optimization of finned-tube heat exchangers for diesel exhaust waste heat recovery using CFD and CCD techniques," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 57, pp. 254–263, 2014.

[36] M. Hatami, D. D. Ganji, and M. Gorji-Bandpy, "A review of different heat exchangers designs for increasing the diesel exhaust waste heat recovery," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 37, pp. 168–181, 2014.

[37] M. Hatami, M. D. Boot, D. D. Ganji, and M. Gorji-Bandpy, "Comparative study of different exhaust heat exchangers effect on the performance and exergy analysis of a diesel engine," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 90, pp. 23–37, 2015.

[38] M. Hatami, D. D. Ganji, and M. Gorji-Bandpy, "Experimental and numerical analysis of the optimized finned-tube heat exchanger for OM314 diesel exhaust exergy recovery," *Energy Convers. Manag.*, vol. 97, pp. 26–41, 2015.

[39] Mohamed Shedid, Moses Sashi Kumar. Review on Exhaust Heat Recovery Systems in Diesel Engine, *International Journal of Advanced Engineering Research and Science (ISSN : 2349-6495(P) | 2456-1908(O))*, vol. 4, no. 11, pp. 091-097, 2017.

[40] A. Tiwari, H. Vasnani, Dr. N. Kumar and M. Labana, A Review on Waste Heat Recovery and Reused of Exhaust Gases from Diesel Engines, *International Journal of Advanced Research in Science and Engineering*, vol. 6, pp. 55-70, 2017.

[41] D.S. Vidhyasagar et al, Performance Analysis and Experimental Investigation On Exhaust Gas Heat Recovery For IC Engines Using Shell And Tube Heat Exchanger, *International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS)*, vol. 4, pp. 51-55, 2017.

- [42] G. Orido, G. Ngunjiri, and M. Njue, "Exhaust Gases Energy Recovered from Internal Combustion Engine for Useful Applications," *IOSR J. Mech. Civ. Eng. Ver. VII*, vol. 14, no. 3, pp. 1–7, 2017.
- [43] D. Kumar and A. Muchrikar, Analysis of Shell and tube Heat Exchanger with and Without Fins for Waste Heat Recovery Applications Using CFD," *IJSRSET*, vol. 3, pp. 453–459, 2017.
- [44] P. Fernández-Yanez, O. Armas, A. Gómez, and A. Gil, "Developing Computational Fluid Dynamics (CFD) Models to Evaluate Available Energy in Exhaust Systems of Diesel Light-Duty Vehicles," *Applied Sciences*, vol. 7, no. 6. 2017.
- [45] T. Y. Kim, A. Negash, and G. Cho, "Experimental and numerical study of waste heat recovery characteristics of direct contact thermoelectric generator," *Energy Convers. Manag.*, vol. 140, pp. 273–280, 2017.
- [46] P. Fernandez-Yanez, A. Gomez, R. García-Contreras, and O. Armas, "Evaluating thermoelectric modules in diesel exhaust systems: potential under urban and extra-urban driving conditions," *J. Clean. Prod.*, vol. 182, pp. 1070–1079, 2018.
- [47] J.E.D. et al., "Performance enhancement of a baffle-cut heat exchanger of exhaust gas recirculation," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 134, pp. 86–94, 2018.
- [48] S. Lan, Z. Yang, R. Chen, and R. Stobart, "A dynamic model for thermoelectric generator applied to vehicle waste heat recovery," *Appl. Energy*, vol. 210, pp. 327–338, 2018.
- [49] A. Nour Eddine, D. Chalet, X. Faure, L. Aixala, and P. Chessé, "Optimization and characterization of a thermoelectric generator prototype for marine engine application," *Energy*, vol. 143, pp. 682–695, 2018.
- [50] C. Finol Parra. "Heat transfer investigations in a modern diesel engine". Doctoral dissertation, University of Bath, 2015.
- [51] J. Dahlstrom. "Experimental Investigations of Combustion Chamber Heat Transfer in a Light-Duty Diesel Engine". Department of Energy Sciences, Lund University, 2016.
- [52] García-León, R., Echavez Díaz, R., & Flórez Solano, E. (2018). Análisis termodinámico de un disco de freno automotriz con pilares de ventilación tipo NACA 66-209. *INGE CUC*, 14(2), 9-18. <https://doi.org/10.17981/ingecuc.14.2.2018.01>